

С 7 1 6 2 6 6 - 1

На правах рукописи

ХУБАТХУЗИН Альберт Анасович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ПАДАЮЩЕГО
ГРУЗА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ
ТЕМПЕРАТУРАХ ОТ 363 К ДО 172 К И ДАВЛЕНИЯХ ДО
196 МПа.**

05.14.05 – теоретические основы теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2000 г

Работа выполнена в Казанском государственном технологическом университете.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Г.Х. Мухамедзянов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.А. Тарзиманов
кандидат технических наук, Р.А. Шагиахметов

Ведущая организация: Всероссийский научно - исследовательский институт углеводородного сырья (г. Казань)

Защита диссертации состоится 30 июня 2000 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 063.37.02 в Казанском государственном технологическом университете по адресу:

420015, г. Казань, ул. К.Маркса, д. 68 (зал заседаний Ученого совета КГТУ, А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского технологического университета.

Автореферат разослан 31 мая 2000 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000947674

А.Г. Лаптев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. При реализации многих инженерных решений, связанных с проектированием и расчетами процессов и аппаратов в химической и нефтехимической технологии, теплоэнергетической, вакуумной, компрессорной и холодильной технике необходимо располагать данными по плотности и вязкости веществ в широкой области изменения температур и давлений. Известно, что подавляющее большинство физических и переносных свойств веществ определяются косвенным образом на основании установленной зависимости между первичной экспериментальной информацией регистрируемой прибором с расчётным уравнением, адекватно определяющим их взаимосвязь. Наличие точного аналитического решения обеспечивает возможность проведения абсолютных измерений и является приоритетной задачей экспериментальных исследований. Проблема актуальна с точки зрения расширения сведений по плотности и коэффициентам динамической вязкости в мало исследованных областях низких температур и высоких давлений и в разработке обоснованных методов расчёта $\eta = f(P, T)$ и $\rho = f(P, T)$.

Работа выполнена в соответствии с Координационным планом НИР РАН по комплексной проблеме "Теплофизика и теплоэнергетика" на 1996–2000 гг. (п. 1.9.1.1.2.1).

Цель работы. Провести экспериментальные исследования плотности и вязкости предельных и непредельных углеводородов при температурах от 172 К до 363 К и давлениях до 196 МПа. На основании полученных данных разработать методы расчёта коэффициентов динамической вязкости жидкостей.

Вышеизложенное позволило определить программу исследований, предусматривающую решение следующих основных задач:

1. Внедрение в экспериментальную практику метода решения дифференциального уравнения Навье - Стокса на основе математической модели движения сплошного груза в цилиндре, заполненного жидкостью, для получения теоретически обоснованного уравнения для вискозиметра с падающим грузом, позволяющего учесть влияние возникающих при этом концевых эффектов и инерционных сил;
2. Реализация универсальной установки для совместных измерений плотности и вязкости в области низких температур и высоких давлений;

3. Создание автоматической системы управления измерительным комплексом на основе IBM PC - совместимых персональных компьютеров;
4. Проведение экспериментальных исследований плотности и вязкости отдельных представителей гомологических рядов предельных и непредельных углеводородов.
5. Установление закономерностей изменения плотности и вязкости измеренных веществ от параметров состояния и молекулярных характеристик;
6. Проведение обобщений экспериментальных данных и разработка на их основе расчётных зависимостей для определения $\eta = f(P, T)$ в широкой области изменения параметров состояния.

Научная новизна.

1. На основе предложенной математической модели получено аналитическое решение течения жидкости через узкий кольцевой канал при обтекании падающего груза для использования метода в абсолютном варианте.
2. Получено расчётное выражение для определения коэффициента динамической вязкости в вискозиметрах с падающим грузом с учётом инерционных и концевых эффектов.
3. Впервые в практике исследований применён совмещённый измерительный комплекс для одновременного измерения вязкости (метод падающего груза в абсолютном варианте) и плотности (метод магнитной подвески) при температурах до 172 К и давлений до 196 МПа.
4. Получены зависимости плотности и коэффициентов динамической вязкости углеводородов от параметров состояния и молекулярных характеристик в области низких температур и высоких давлений.

Практическая ценность.

1. Измерены коэффициенты динамической вязкости и плотности углеводородов. Получены значения $\eta = f(P, T)$ и $\rho = f(P, T)$ при температурах ниже 273 К и давлениях до 196 МПа.
2. Разработана автоматическая система управления измерительным комплексом, применённая в данной работе для регулирования температуры в процессе эксперимента.
3. Предложены уравнения для расчёта $\eta = f(P, T)$ на основе суще-

ствующих представлений о подобию процессов молекулярного переноса.

Автор защищает. Математическую модель, на основе которой получено уравнение для расчёта коэффициентов динамической вязкости, результаты измерения плотности и вязкости жидких органических соединений в широком интервале изменения параметров состояния, метод расчёта коэффициента динамической вязкости исследованных жидкостей во всём интервале изменения параметров состояния.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международной конференции “Состояние и перспективы развития вакуумной техники. Вакуум-96” (1996 г. Казань), на международной конференции “Методы кибернетики химико-технологических процессов” (1999 г. Казань); на отчётных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Казанского государственного технологического университета в 1997–2000 гг.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 7 работах.

Объём работы и её структура. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (58 наименований), и приложения. Работа содержит 123 страниц машинописного текста, в том числе 27 рисунка, 21 таблицу и 20 страниц приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

1. Теоретические основы метода падающего груза для измерения коэффициентов динамической вязкости жидкостей.

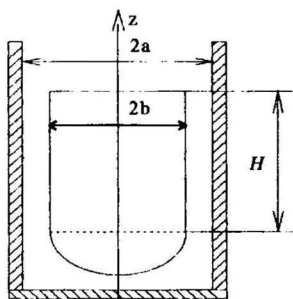


Рисунок 1. Принципиальная схема измерительной ячейки.

Предложена математическая модель движения жидкости при обтекании падающего цилиндрического груза и получено расчётное выражение, впервые обеспечившее использование метода падающего груза, для точных абсолютных измерений коэффициентов динамической вязкости жидкостей.

Принципиальная схема ячейки приведена на рисунке 1.

Задача ставится при следующих условиях: жидкость ньютоновская, несжимаемая, движение жидкости в кольцевом канале установившееся, осесимметричное, изотермичное, следовательно, полностью подчиняется уравнениям Навье - Стокса

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{U} \cdot \text{grad } \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } \vec{P} + \nu \cdot \nabla^2 \vec{U} + \vec{F}. \quad (1)$$

С учётом перечисленных выше условий, в цилиндрической системе координат уравнение (1) будет иметь вид:

$$\eta \left(\frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) = \frac{\partial P}{\partial z} - \rho \cdot g. \quad (2)$$

Интегрируя дважды, получим распределение скоростей в кольцевом канале:

$$U = \left(\rho \cdot g - \frac{\partial P}{\partial z} \right) \cdot \frac{r^2}{4\eta} + C_1 \ln r + C_2 = Ar^2 + C_1 \ln r + C_2. \quad (3)$$

Градиент давления на цилиндрической части груза определяется из уравнения расхода жидкости через кольцевой канал:

$$Q_{kk} = 2\pi \int_b^a U r \cdot dr = \bar{U} \cdot S_{kk}, \quad (4)$$

который равен количеству жидкости, вытесненной грузом

$$Q_{\Gamma} = Q_{kk} = W \cdot S_{\Gamma}. \quad (5)$$

Подставив в (4) выражение (3) и приравняв (5), получим:

$$\pi b^2 W = 2\pi \int_b^a U r dr = 2\pi \int_b^a [Ar^2 + C_1 \ln r + C_2] r dr. \quad (6)$$

Решив интегралы, найдём выражение для нахождения A

$$A = \frac{1}{(a^2 - b^2) - (a^2 + b^2) \cdot \ln a/b} \cdot W.$$

С учётом (4) градиент давления будет определяться как:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho \cdot g + \frac{4W}{(a^2 - b^2) - (a^2 + b^2) \cdot \ln a/b} \cdot \eta. \quad (7)$$

Рассматривая систему жидкость и движущийся в ней равномерно груз, баланс сил, действующих на груз равняется

$$F_{\text{тяж}} = F_{\text{Арх}} + F_{\Delta P}^{\text{цил}} + F_{\text{тр}}^{\text{цил}}, \quad (8)$$

где $F_{\text{тяж}} = m \cdot g$, $F_{\text{Арх}} = V \cdot \rho \cdot g$; $F_{\Delta P}^{\text{цил}} = \pi b^2 \int_0^H \frac{\partial P}{\partial z} \cdot dz$,

$$F_{\Delta P}^{\text{цил}} = \pi b^2 \int_0^H \left[\rho g + \frac{4W}{K} \eta \right] dz = \pi b^2 H \rho g + 4\pi b^2 H \frac{W}{K} \eta = \pi b^2 H \rho g + F_I \eta,$$

$$F_{\text{тр}}^{\text{цил}} = \eta \int_0^H \frac{\partial U}{\partial r} 2\pi b dz = 2\pi b H \left(-\frac{2Wb}{K} + W \frac{1 + (a^2 - b^2)/K}{b \cdot \ln a/b} \right) \eta = F_2 \eta.$$

После подстановки в (8) значений сил получим:

$$\eta = \frac{(mg - V\rho g - \pi b^2 H \rho g) \cdot \left[(a^2 + b^2) \ln a/b - (a^2 - b^2) \right]}{2\pi H W (a^2 + b^2)}. \quad (9)$$

Расчёт коэффициентов динамической вязкости по выражению (9) не учитывает концевые эффекты и даёт значения, завышенные на 10÷15 % относительно экспериментальных результатов. Для получения точных соотношений, необходимо располагать решением уравнения движения жидкости в канале переменного сечения, что является сложной задачей. Нами предложен подход, основанный на двух допущениях для приближённой модели груза, приведённой на рисунке 2:

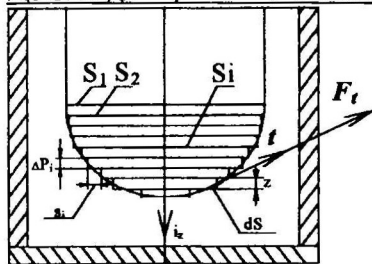


Рисунок 2 Приближённая модель груза.

1. Сферическую лобовую часть груза можно рассматривать как набор элементарных цилиндров.
2. В пределах цилиндрика скорость жидкости постоянна $\partial U_z / \partial z = 0$.

Эти допущения дают нам основание распространить ис-

ходные формулы распределения скоростей и градиента давления, полученные для цилиндрической части груза, на каждый из элементарных цилиндров полусферы. Градиент давления вдоль каждого элементарного цилиндрика. будет подчиняться следующему распределению

$$\frac{dP}{dz} = \rho g + 4W \frac{\left[a^2 - (a - h')^2 \right] + 2 \left[b^2 - (a - h')^2 \right] \ln \frac{a}{a - h'}}{\left[a^4 - (a - h')^4 \ln \frac{a}{a - h'} \right] - \left(a^2 - (a - h')^2 \right)^2} \eta, \quad (10)$$

где h' - ширина кольцевого канала.

Для сил, вызванных перепадом давления и вязкостного трения, имеем

$$\begin{aligned} F_{\Delta P}^{\text{сф}} &= \frac{2}{3} \pi b^3 \rho g + 4\pi W \eta \int_0^b \frac{\left(a^2 - b^2 + z^2 + 2z^2 \ln a/d \right) d^2}{\left[a^4 - (b^2 - z^2)^2 \right] \ln a/d - \left(a^2 - b^2 + z^2 \right)^2} dz = \\ &= \frac{2}{3} \pi b^3 \rho g + 4\pi W \cdot I_1 \cdot \eta = \frac{2}{3} \pi b^3 \rho g + F_3 \cdot \eta \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $S = \pi \cdot (b^2 - z^2)$, $d = \sqrt{b^2 - z^2}$.

$$\begin{aligned} F_{\text{мп}}^{\text{сф}} &= \eta \int_0^b \frac{\partial U}{\partial r} L dz = \eta (-4\pi W \int_0^b \frac{\left(a^2 - b^2 + z^2 + 2z^2 \ln a/d \right) d^2}{\left[a^4 - (b^2 - z^2)^2 \right] \ln a/d - \left(a^2 - b^2 + z^2 \right)^2} dz + \\ &+ 2\pi W \left(\int_0^b \frac{1}{\ln a/d} dz + \int_0^b \frac{\left(a^2 - b^2 + z^2 \right) \cdot \left(a^2 - b^2 + z^2 + 2z^2 \ln a/d \right)}{\ln a/d \cdot \left[a^4 - (b^2 - z^2)^2 \right] \ln a/d - \left(a^2 - b^2 + z^2 \right)^2} dz \right) = \\ &= \eta \cdot \left(-4\pi W I_1 + 2\pi W (I_2 + I_3) \right) = F_4 \cdot \eta \end{aligned} \quad (12)$$

Интегралы в (11) и (12) решены численным способом по методу Гаусса и рассчитаны для всего ряда используемых нами грузов с шагом по диаметру 1мм. и обработаны полиномом 4-й степени в виде:

$$I_i = \sum_{i=0}^4 C_i \cdot (1/(a - b))^i \quad (13)$$

Поправка на изменение количества движения жидкости при обтекании полусферы от состояния покоя до установившейся скорости в кольцевом канале определяется, как

$$F_{ин} = \rho S_{kk} U dU = \rho S_{kk} \frac{U^2}{2} \bigg|_0^{\bar{U}_{kk}}, \quad \text{где } \bar{U}_{kk} = W^{S\Gamma/S_{kk}}. \quad (14)$$

$$\text{Подставляя значение } \bar{U}_{kk}, \text{ получим: } F_{ин} = \rho W^2 \frac{S_z^2}{(2S_{kk})}. \quad (15)$$

Общий баланс сил, действующих на движущийся груз, имеет вид

$$F_{тяж} = F_{Арх} + F_{тр}^{чил} + F_{\Delta P}^{чил} + F_{тр}^{сф} + F_{\Delta P}^{сф} + F_{ин}. \quad (16)$$

После подстановки в (16) значений сил получим конечное расчётное выражение для определения коэффициента динамической вязкости:

$$\eta = \frac{mg - V\rho g - \pi b^2 H \rho g - \frac{2}{3} \pi b^3 \rho g - F_{ин}}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}. \quad (17)$$

Формула (17) применима для расчёта коэффициентов динамической вязкости жидкостей на основе первичных опытных данных в широкой области изменения температур и давлений.

Изменение размеров элементов измерительной системы под действием температуры учитывалось введением поправки на линейное сжатие, под действием давления – по формулам теории упругости.

2. Экспериментальная установка для одновременного измерения плотности и вязкости жидкостей

Исследования вязкости и плотности проводились на установке, реализующий при измерении плотности метод магнитной подвески, а при определении коэффициента динамической вязкости – метод падающего груза. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2.

Принцип измерения плотности основан на подвешивании магнитного поплавка в положении устойчивого равновесия. Система подвески содержит основную 8 и две градиентные 9 катушки, расположенные симметрично относительно точки подвеса поплавка. Поплавок подвешен в таком положении, что магнитное поле основной катушки удерживает его от горизонтальных смещений от оси системы. Две другие катушки подвеса (градиентные) расположены симметрично на равных расстояниях по высоте от поплавка. Включены они последовательно таким образом, что напряженность поля, создаваемого ими в точке подвеса, равна нулю.

Значение плотности определяется по формуле

$$\rho = \frac{m - (CJ_{осн} - DJ_{град})}{V}, \quad (18)$$

где $C = C_1/g$; $D = D_1/g$, C_1 и D_1 - коэффициенты, зависящие от взаимного расположения катушек и поплавок, его магнитного момента, характеристик соленоидов, m , V - масса и объем поплавка, $J_{осн}$ $J_{град}$ - ток в основной и градиентной катушке соответственно.

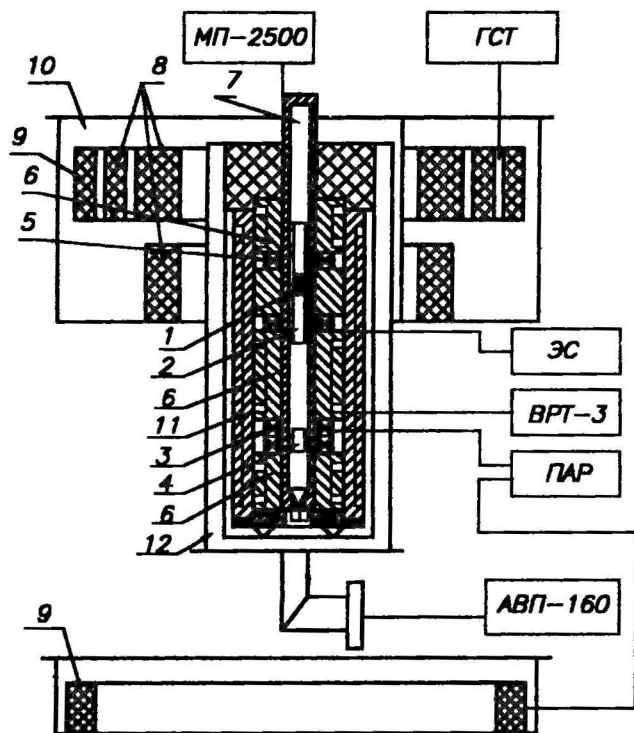


Рисунок 2. Схема измерительного узла.

1-груз; 2-измерительная трубка; 3-прецизионные датчики положения; 4-поплавок; 5-индуктивные датчики; 6-нагреватели; 7-автоклав; 8-основная катушка; 9-градиентная катушка; 10-термостатируемая ванна; 11-медный блок; 12-вакуумная камера. МП-2500 - грузопоршневой манометр для создания и поддержания давления; ГСТ - генератор стабильного тока; ЭС - электронный секундомер; ВРТ-3 - высокоточный регулятор температуры; ПАР - прецизионный автоматический регулятор положения; АВП-160 - агрегат вакуумный.

Ячейка для измерения вязкости представляет собой выполненный из магнитной стали 2Х13 груз 1, который падает вдоль оси измерительной трубки 2, изготовленной из титанового сплава ВТ-3. Длина трубки равна 120 мм, внутренний диаметр $6,112 \pm 0,002$ мм. Форма груза - цилиндр со сферическим нижним концом высотой $h=1,75d$, где d -диаметр груза, равный 5.650-6.050мм. d -подбирается индивидуально для обеспечения ползучего течения жидкости в кольцевом канале.

Для автоматического управления экспериментальной установкой был создан многофункциональный контроллер на базе персонального компьютера IBM PC, используемый в данной работе для регулирования и поддержания температуры в ходе эксперимента.

Согласно рекомендациям ВНИИМ им. Д.И. Менделеева проведена оценка погрешности измерения $\rho = f(P, T)$ и $\eta = f(P, T)$. Она составила $\pm 0,24$ % для плотности и $\pm 1,37$ % для вязкости.

3. Измерение коэффициентов динамической вязкости и плотности жидких органических соединений.

В программу экспериментального исследования вязкости и плотности были включены: н-гексан, н-гептан, гексен-1 и октен-1. Результаты измерения $\rho = f(P, T)$ и $\eta = f(P, T)$ представлены в таблице 1. Согласно наших измерений с литературными данными является удовлетворительным. Из экспериментальных данных следует, что вязкость и плотность углеводородов возрастает с увеличением молекулярной массы веществ и давлений во всём интервале измеренных температур и давлений и уменьшаются с повышением температуры. Наименьшие значения $\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P$ характерны для низких температур вблизи точки плавления и высоких давлений. Производная $\left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_T$ увеличивается с повышением температуры и понижением давления. Наибольшие значения производной $\left(\frac{\partial \eta}{\partial T}\right)_P$ для всех исследованных веществ отмечены вблизи температуры плавления. Производные $\left(\frac{\partial \eta}{\partial T}\right)_P$ и $\left(\frac{\partial \eta}{\partial P}\right)_T$ возрастают с увеличением давления и молекулярной массы. Для этиленовых углеводородов характер изменения $\rho = f(P, T)$ и $\eta = f(P, T)$ схож с характером изменения предельных углеводородов. Наличие двойной связи в угле-

родной цепи молекул приводит к уменьшению вязкости и увеличению плотности во всём интервале исследованных параметров состояния.

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования плотности (ρ) и коэффициента динамической вязкости (η) углеводородов

Т, К	ρ , кг/м ³	η , мПа с	Т, К	ρ , кг/м ³	η , мПа с
1	2	3	4	5	6
н-гексан					
p=0,098 МПа			p=49 МПа		
332,84	625,86	0,213	273,76	695,81	0,618
325,10	632,21	0,230	264,02	703,58	0,722
312,58	642,66	0,259	253,25	711,61	0,845
304,12	649,79	0,281	243,96	719,15	0,984
293,09	659,41	0,308	232,98	727,51	1,205
281,48	668,99	0,349	p=98 МПа		
273,56	675,70	0,378	273,81	706,19	0,960
264,07	683,68	0,419	263,95	713,55	1,143
253,33	692,58	0,478	253,07	721,79	1,364
244,03	700,22	0,538	243,84	728,77	1,598
232,95	709,19	0,633	233,05	737,03	1,982
223,68	716,33	0,737	p=147 МПа		
212,34	724,90	0,908	273,90	715,39	1,401
203,52	731,31	1,090	263,84	722,37	1,685
192,88	738,74	1,393	252,84	730,23	2,021
182,84	745,83	1,804	243,69	736,84	2,386
н-гептан					
p=0,098 МПа					
363,85	613,46	0,218	273,00	697,96	0,521
353,36	624,70	0,228	263,52	706,16	0,605
342,47	635,28	0,250	250,14	717,74	0,723
334,08	644,64	0,264	242,86	724,02	0,829
321,98	654,25	0,319	233,81	731,83	0,951
313,58	662,60	0,327	223,17	740,99	1,146
302,95	670,88	0,358	249,72	766,24	1,593
293,73	679,32	0,405	233,29	780,08	2,253
283,48	688,84	0,446	212,21	796,14	3,544

p=49 МПа			p=147 МПа		
272,98	729,99	0,790	273,15	767,44	1,557
249,96	745,51	1,107	249,45	783,54	2,284
233,58	759,47	1,485	232,97	797,27	3,173
212,39	777,64	2,372	211,99	809,23	5,215
p=98 МПа			p=176,4 МПа		
273,04	752,38	1,080	273,34	775,35	1,728
249,72	766,24	1,593	248,97	790,78	2,581
233,29	780,08	2,253	232,67	804,23	3,697
212,21	796,14	3,544	211,72	814,91	6,058
гексен-1					
p=0,098 МПа			p=29,4 МПа		
271,45	694,20	0,338	271,45	715,56	0,448
255,27	713,24	0,405	255,38	729,77	0,547
233,42	732,61	0,542	233,22	748,66	0,752
212,74	748,03	0,750	212,62	764,20	1,059
193,81	761,27	1,219	193,67	776,41	1,784
171,95	774,33	3,237	172,18	786,74	4,396
p=9,8 МПа			p=49 МПа		
271,45	705,31	0,352	271,36	726,32	0,524
255,30	721,76	0,431	255,49	737,29	0,648
233,34	740,30	0,608	233,08	755,08	0,902
212,69	756,48	0,817	212,53	770,85	1,292
193,74	769,30	1,299	193,59	782,42	2,219
172,06	780,74	3,754	172,34	791,53	5,336
октен-1					
p=0,098 МПа			p=9,8 МПа		
272,84	738,30	0,620	272,84	744,74	0,693
253,42	754,04	0,819	253,37	759,69	0,923
233,71	769,07	1,280	233,67	773,88	1,456
213,05	782,43	2,467	213,09	786,97	2,835
191,38	795,70	5,200	191,46	799,84	6,031
p=29,4 МПа			p=147 МПа		
272,84	753,90	0,831	273,05	808,68	1,684
253,16	768,49	1,119	252,90	820,92	2,460
233,23	782,79	1,807	233,28	830,07	4,039

212,44	795,12	3,482	p=166,6 МПа		
193,52	808,01	7,547	273,11	816,24	1,856
p=49 МПа			252,81	825,43	2,782
272,84	765,07	0,948	233,21	834,24	4,730
253,42	776,61	1,280	p=176,4 МПа		
233,75	792,05	2,099	273,19	818,52	2,094
212,32	805,34	4,081	252,74	827,54	2,915
193,44	814,51	9,037	p=186,2 МПа		
p=68,6 МПа			273,22	820,76	2,176
272,89	775,22	1,094	252,70	829,70	3,019
253,08	788,05	1,474	p=196 МПа		
233,43	802,51	2,440	273,26	822,77	2,349
213,35	812,07	4,985	252,64	831,46	3,146
191,66	822,14	11,031			
p=98 МПа					
272,96	789,14	1,315			
252,98	802,39	1,801			
233,39	815,03	2,939			
213,42	824,70	6,364			

4. Методы расчёта коэффициентов динамической вязкости углеводородов и обобщение экспериментальных данных.

На основе обширного материала по коэффициентам динамической вязкости, приведённых в работе и в литературных источниках, рассмотрены возможности применения методов, основанных на теории свободного объёма и на представлениях о подобии. Методы свободного объёма и соответственных состояний показали хорошую сходимость расчётных и экспериментальных данных при $P=0,098$ МПа и непригодность в области высоких давлений.

Исходя из анализа существующих методов обобщения наиболее целесообразной представляется применение зависимости относительного изменения вязкости от изменения энтропии:

$$\frac{\eta_{P,T}}{\eta_{P_0,T}} = f\left(\frac{S_{P,T}}{S_{P_0,T}}\right), \quad (19)$$

На рисунке 4 приведена обобщённая зависимость экспериментальных данных по вязкости н-гептана в интервале температур от 193 К до 363 К и давлений до 176 МПа. Из рисунка 4 следует, что все опытные данные группируются около единой обобщённой зависимости



Рисунок 4. Зависимость относительного изменения вязкости от относительного изменения энтропии

На рисунке 5 представлена зависимость относительного изменения вязкости от приращения энтропии в виде

$$\ln \frac{\eta_{P,T}}{\eta_{P_0,T}} = f\left(-A \cdot \frac{\Delta S_T}{R}\right), \quad (20)$$

где $\Delta S_T = S_{P,T} - S_{P_0,T} = - \int_{P_0}^P \left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_P dP$ – приращение энтропии при изменении давления от P_0 до P при $T = \text{const}$.

Зависимость (20) аппроксимируется выражением

$$\eta_{P,T} = \eta_{P_0,T} \exp\left(-A \frac{\Delta S_T}{R}\right) \quad (21)$$

где $A = \exp(a_0 + a_1(T - 298,15))$,

a_0, a_1 – постоянные для каждого вещества.

Расхождения между экспериментальными и расчётными данными, полученными на основе обобщённой зависимости не превышает $\pm 4\%$ во всём интервале изменения параметров состояния. Значения производной $\left(\frac{\partial \eta}{\partial T}\right)_P$ определяются по экспериментальным $P\eta T$ - данным.

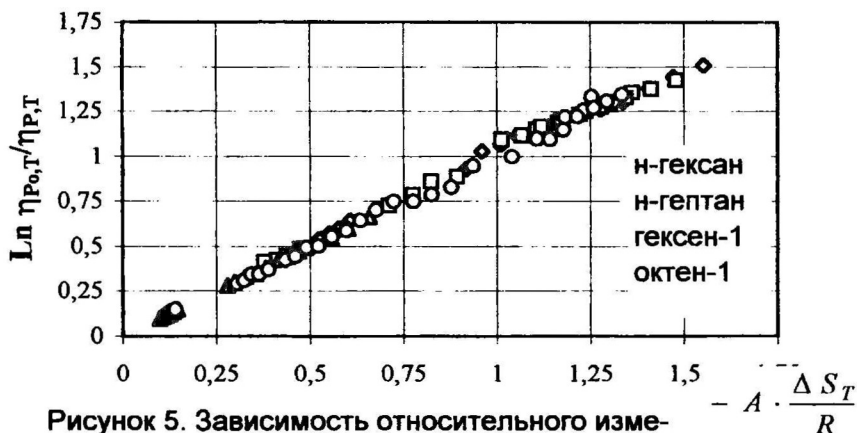


Рисунок 5. Зависимость относительного изменения вязкости от приращения энтропии

Выводы

1. В соответствии с задачами исследования на основе предложенной математической модели процесса истечения вязкой жидкости через узкий кольцевой канал между непроницаемой трубкой и падающим в ней коаксиально цилиндрическим грузом получено расчётное выражение (18) для использования метода падающего груза в абсолютном варианте (без калибровочных опытов) для определения коэффициентов динамической вязкости.
2. Проверка работоспособности уравнения (18), проведённая на основе сравнения результатов расчёта с экспериментальными данными для различных классов соединений в широком интервале изменения температур и давлений, показывает справедливость принятой математической модели. Оценка погрешности эксперимента, проведённая по рекомендациям ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, показала, что расчётная погрешность при определении коэффициента динамической вязкости составляет 1,37 %, а для плотности – 0,24 %. Установлены надёжные границы применимости уравнения (18) в диапазоне $0,92 \leq d/D \leq 0,98$ при значениях $Re \leq 3$.
3. Разработана автоматическая система управления экспериментальным комплексом. При проведении исследований $\rho = f(P, T)$ и $\eta = f(P, T)$ применён многофункциональный контроллер на базе

персонального компьютера IBM PC для регулирования и поддержания температуры в процессе эксперимента.

4. Представлены результаты измерения плотности и вязкости углеводородов в широком интервале изменения температур и давлений. Для н-гексана и н-гептана значения плотности и вязкости при давлениях выше 0,098 МПа, а для гексена-1 и октена-1 – выше 49 МПа получены впервые. Установлены особенности изменения плотности и вязкости углеводородов от температуры, давления и молекулярной массы.
5. Проведены обобщения результатов измерения коэффициентов динамической вязкости при давлениях до 196 МПа в интервале изменения температур от 363 К до 172 К. Предложены уравнения для определения коэффициентов динамической вязкости

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Борисов В.Б., Хубатхузин А.А., Сагдеев Д.И., Мухамедзянов Г.Х. Способ измерения вязкости вакуумных рабочих жидкостей. Международная научно-техническая конференция "Состояние и перспективы развития вакуумной техники. Вакуум-96" Казань, 1996, с.27.
2. Борисов В.Б., Хубатхузин А.А., Сагдеев Д.И., Мухамедзянов Г.Х. Метод падающего груза для измерения вязкости вакуумных рабочих жидкостей. Вакуумная техника и технология, 1997, том 7, №1, с. 34-38.
3. Борисов В.Б., Хубатхузин А.А., Неглядеев М.В., Якобсон М.М., Мухамедзянов Г.Х. Автоматическая система управления лабораторным измерительным комплексом. Приборы и техника эксперимента, 1998, №4, с.162-164.
4. Хубатхузин А.А., Неглядеев М.В., Мухамедзянов Г.Х. установка для комплексного исследования теплофизических свойств жидкостей. V международная конференция "Методы кибернетики химико-технологических процессов", Казань, 1999, с. 221-222.
5. Хубатхузин А.А., Сагдеев Д.И., Мухамедзянов Г.Х. Использование метода падающего груза для исследования средне- и высоковязких жидкостей. V международная конференция "Методы кибернетики химико-технологических процессов", Казань, 1999, с. 245-246.
6. Хубатхузин А.А., Сагдеев Д.И., Мухамедзянов Г.Х. Вязкость и плотность органических жидкостей при низких температурах и давлениях до 196 МПа. - Казань, 2000. - 12 с. - Рукопись представлена Казан. гос. технол. ун-том. Деп. в ВИНТИ 10 апреля 2000 г., № 975 - ВОО.
7. Хубатхузин А.А., Сагдеев Д.И., Мухамедзянов Г.Х. Оценка работоспособности расчётного выражения для вискозиметра с падающим грузом. - Казань, 2000. - 17 с. - Рукопись представлена Казан. гос. технол. ун-том. Деп. в ВИНТИ 10 апреля 2000 г., № 976 - ВОО.

Соискатель

Кудай

Лицензия № 020404 от 6.03.97 г.

Заказ **188**

Тираж 100 экз.

Офсетная лаборатория Казанского государственного
технологического университета
420015, Казань, К. Маркса, 68

200